

*Jerzy M. Sawicki*

# MECHANIKA

*przeptywów*

*Gdańsk 2009*

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Romuald Szymkiewicz*

RECENZENT

*Czesław Grabarczyk*

*Michał Szydłowski*

PROJEKT OKŁADKI

*Katarzyna Olszonowicz*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Wydawnictwa PG można nabywać w Księgarni PG (Gmach Główny, I piętro)  
bądź zamówić pocztą elektroniczną ([ksiegarnia@pg.gda.pl](mailto:ksiegarnia@pg.gda.pl)),  
faksem (058 347 16 18) lub listownie (Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,  
Księgarnia PG, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk)  
[www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG](http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej  
Gdańsk 2009

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-278-4

---

# Spis treści

|   |    |
|---|----|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli .....                   | 9  |
| Słowo wstępne .....   | 13 |
| <b>Część I – MECHANIKA PŁYNÓW</b>                             |    |
| 1. Mechanika płynów newtonowskich .....                       | 15 |
| 1.1. Molekularna budowa materii .....                         | 15 |
| 1.2. Pojęcie ośrodka ciągłego .....                           | 15 |
| 1.3. Podstawowe zagadnienia mechaniki ośrodków ciągłych ..... | 18 |
| 1.3.1. Uwagi ogólne .....                                     | 18 |
| 1.3.2. Rodzaje wielkości fizycznych .....                     | 19 |
| 1.3.3. Gęstość rozkładu wielkości fizycznej .....             | 21 |
| 1.3.4. Uśrednianie wielkości fizycznych .....                 | 23 |
| 1.3.5. Ruch materii .....                                     | 24 |
| 1.3.6. Mechaniczne oddziaływania ciał materialnych .....      | 25 |
| 1.3.6.1. Siły i ich rodzaje .....                             | 25 |
| 1.3.6.2. Jednostkowa siła masowa .....                        | 25 |
| 1.3.6.3. Gęstość rozkładu siły powierzchniowej .....          | 26 |
| 1.3.6.4. Stan naprężenia .....                                | 29 |
| 1.4. Fizyczne własności materii .....                         | 31 |
| 1.4.1. Materia jako ośrodek dyskretny .....                   | 31 |
| 1.4.2. Materia jako ośrodek ciągły .....                      | 32 |
| 1.4.2.1. Stany skupienia materii .....                        | 32 |
| 1.4.2.2. Pojęcie płynności .....                              | 34 |
| 1.4.2.3. Hipoteza Newtona – ujęcie jakościowe .....           | 35 |
| 1.4.2.4. Stałe materiałowe .....                              | 35 |
| 1.5. Opis stanu substancji płynnej .....                      | 39 |
| 1.5.1. Możliwości określania stanu materii .....              | 39 |
| 1.5.2. Klasyfikacja praw przyrody .....                       | 40 |
| 1.5.3. Zmienne stanu .....                                    | 40 |
| 1.5.4. Pomocnicze wielkości fizyczne .....                    | 41 |
| 1.5.5. Pochodna substancjalna .....                           | 44 |
| 1.5.6. Metody empiryczne .....                                | 46 |
| 1.5.7. Metoda analizy wymiarowej .....                        | 47 |
| 2. Kinematyka płynów .....                                    | 51 |
| 2.1. Pojęcia podstawowe .....                                 | 51 |
| 2.2. Trajektoria elementu płynu i linia prądu .....           | 52 |
| 2.3. Pierwsze twierdzenie Helmholtza .....                    | 55 |
| 2.3.1. Zmienność pola prędkości .....                         | 55 |
| 2.3.2. Prędkość kątowna elementu masy .....                   | 57 |
| 2.3.3. Prędkość deformacji kątownej elementu masy .....       | 59 |
| 2.3.4. Prędkość deformacji liniowej elementu płynu .....      | 59 |
| 2.3.5. Twierdzenie Helmholtza i jego znaczenie .....          | 60 |
| 2.4. Linie wirowe .....                                       | 61 |
| 2.5. Kinematyczna charakterystyka przepływów .....            | 61 |
| 2.6. Pojęcie strumienia .....                                 | 62 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 3. Dynamika płynów .....  | 65  |
| 3.1. Przedmiot dynamiki .....   | 65  |
| 3.2. Ogólne cechy praw zachowania .....                               | 65  |
| 3.3. Bilans masy .....  | 66  |
| 3.3.1. Prawo zachowania masy .....                                    | 66  |
| 3.3.2. Równanie zachowania masy dla przypadku ogólnego .....          | 67  |
| 3.3.3. Równanie zachowania masy dla strumienia .....                  | 68  |
| 3.4. Bilans pędu .....  | 69  |
| 3.4.1. Prawo zachowania pędu .....                                    | 69  |
| 3.4.2. Równanie zachowania pędu dla przypadku ogólnego .....          | 69  |
| 3.4.3. Równanie zachowania pędu dla strumienia .....                  | 72  |
| 3.5. Szczególne postacie wyprowadzonych równań .....                  | 76  |
| 3.5.1. Techniczne wersje równań zachowania masy i pędu .....          | 76  |
| 3.5.2. Napór hydrodynamiczny .....                                    | 77  |
| 3.6. Pozostałe prawa o charakterze bilansowym .....                   | 80  |
| 3.6.1. Prawo zachowania momentu pędu .....                            | 80  |
| 3.6.2. Prawo zachowania energii .....                                 | 81  |
| 3.6.3. Prawo bilansu entropii .....                                   | 82  |
| 3.7. Zestawienie liczby równań i niewiadomych .....                   | 83  |
| 3.8. Równanie stanu .....   | 84  |
| 3.9. Równania konstytutywne .....                                     | 85  |
| 3.9.1. Uwagi ogólne .....   | 85  |
| 3.9.2. Hipoteza Newtona – ujęcie ilościowe .....                      | 85  |
| 3.9.2.1. Przypadek ogólny .....                                       | 85  |
| 3.9.2.2. Strumień podłużny .....                                      | 87  |
| 3.9.3. Prawo Fouriera .....   | 87  |
| 3.10. Równania ruchu .....  | 87  |
| 3.10.1. Przypadek ogólny – równanie Naviera-Stokesa .....             | 87  |
| 3.10.2. Strumień podłużny .....                                       | 90  |
| 4. Formułowanie problemów hydromechaniki .....                        | 91  |
| 4.1. Uwagi ogólne .....   | 91  |
| 4.2. Opis układu i jego własności .....                               | 92  |
| 4.3. Warunki graniczne .....  | 95  |
| 4.3.1. Warunki początkowe .....                                       | 95  |
| 4.3.2. Warunki brzegowe .....   | 95  |
| 4.4. Rozwiązywanie zadań hydromechaniki .....                         | 97  |
| 4.5. Upraszczanie równań ruchu .....                                  | 100 |
| 5. Hydrostatyka .....   | 101 |
| 5.1. Uwagi ogólne .....   | 101 |
| 5.2. Podstawowe równania .....  | 101 |
| 5.3. Ciśnienie hydrostatyczne .....                                   | 102 |
| 5.3.1. Płyny nieściśliwe .....  | 102 |
| 5.3.2. Płyny ściśliwe .....   | 104 |
| 5.4. Napór hydrostatyczny .....                                       | 104 |
| 5.5. Punkt przyłożenia naporu hydrostatycznego .....                  | 107 |
| 5.6. Wypór hydrostatyczny .....                                       | 108 |
| 5.7. Pływanie ciał nieruchomych .....                                 | 109 |
| 6. Równanie Bernoulliego .....  | 113 |
| 6.1. Uwagi wstępne .....  | 113 |
| 6.2. Wyprowadzenie równania Bernoulliego .....                        | 113 |
| 6.2.1. Założenia upraszczające .....                                  | 113 |
| 6.2.2. Równanie Bernoulliego dla strumienia cieczy rzeczywistej ..... | 114 |
| 6.2.3. Interpretacja trójmianu Bernoulliego .....                     | 115 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.2.4. Linia ciśnienia i linia energii .....                       | 117 |
| 6.2.5. Wyznaczanie strat energii .....                             | 119 |
| 6.2.6. Równanie Bernoulliego dla strugi oraz dla linii prądu ..... | 120 |
| 6.2.7. Równanie Bernoulliego dla cieczy nielepkiej .....           | 121 |
| 6.2.8. Trójmian Bernoulliego dla płynu ściśliwego .....            | 123 |
| 6.2.9. Pojęcie ciśnienia .....                                     | 124 |
| 7. Turbulencja .....   | 125 |
| 7.1. Ogólna charakterystyka ruchu turbulentnego .....              | 125 |
| 7.2. Generacja turbulencji .....                                   | 127 |
| 7.3. Równania Reynoldsa .....                                      | 129 |
| 7.4. Modelowanie turbulencji .....                                 | 131 |
| 7.4.1. Koncepcja podstawowa .....                                  | 131 |
| 7.4.2. Model algebraiczny .....                                    | 132 |
| 7.4.3. Model Prandtla .....  | 132 |
| 7.4.4. Inne modele turbulencji .....                               | 132 |
| 7.5. Rozwiązywanie zagadnień .....                                 | 133 |
| 7.5.1. Przypadek ogólny .....                                      | 133 |
| 7.5.2. Równanie Bernoulliego dla ruchu turbulentnego .....         | 134 |
| 7.5.3. Profil prędkości typu logarytmicznego .....                 | 134 |
| 8. Warstwa przyścienna .....                                       | 138 |
| 8.1. Pojęcia podstawowe .....                                      | 138 |
| 8.2. Laminarna a turbulentna warstwa przyścienna .....             | 140 |
| 8.3. Formowanie się profilu prędkości strumienia .....             | 141 |
| 8.4. Pojęcie ścianki hydraulicznie gładkiej .....                  | 143 |
| 8.5. Oderwanie warstwy przyściennej .....                          | 144 |
| 8.6. Temperaturowa warstwa przyścienna .....                       | 145 |
| 9. Modele kinematyczne .....                                       | 147 |
| 9.1. Uwagi ogólne .....  | 147 |
| 9.2. Funkcja prądu i jej własności .....                           | 148 |
| 9.2.1. Ruch płaski .....   | 148 |
| 9.2.2. Funkcja prądu .....   | 148 |
| 9.2.3. Własności funkcji prądu .....                               | 148 |
| 9.3. Płaski ruch potencjalny .....                                 | 150 |
| 9.3.1. Charakterystyka modelu .....                                | 150 |
| 9.3.2. Podstawowe równanie modelu .....                            | 150 |
| 9.3.3. Formułowanie zagadnienia .....                              | 151 |
| 9.3.4. Rozwiązywanie zagadnienia .....                             | 152 |
| 9.4. Model biharmoniczny .....                                     | 153 |
| 9.4.1. Opis modelu .....   | 153 |
| 9.4.2. Formułowanie zagadnienia .....                              | 153 |
| 9.4.3. Rozwiązywanie zagadnienia .....                             | 154 |
| 9.5. Ruch śrubowy .....  | 155 |
| 9.5.1. Charakterystyka ogólna .....                                | 155 |
| <b>Część II – HYDRAULIKA</b>                                       |     |
| 10. Problematyka hydrauliki .....                                  | 157 |
| 10.1. Uwagi ogólne .....   | 157 |
| 10.2. Schematy obliczeniowe hydrauliki .....                       | 159 |
| 10.3. Podstawowe równania hydrauliki .....                         | 160 |
| 11. Ruch cieczy w pojedynczych przewodach zamkniętych .....        | 161 |
| 11.1. Charakterystyka zagadnienia .....                            | 161 |
| 11.1.1. Aspekty funkcjonalne i techniczne .....                    | 161 |
| 11.1.2. Aspekty hydrauliczne .....                                 | 164 |

---

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 11.2.     | Ustalony przepływ jednostajny w pojedynczym przewodzie zamkniętym .....           | 166 |
| 11.2.1.   | Równania ruchu .....  | 166 |
| 11.2.2.   | Obliczanie strat energii mechanicznej .....                                       | 167 |
| 11.2.2.1. | Uwagi ogólne .....  | 167 |
| 11.2.2.2. | Straty na długości .....  | 169 |
| 11.2.2.3. | Współczynnik strat liniowych .....  | 170 |
| 11.2.2.4. | Charakterystyka przepływu .....   | 171 |
| 11.2.2.5. | Straty lokalne .....  | 172 |
| 11.2.3.   | Praktyczne postacie równań ruchu .....  | 173 |
| 11.2.3.1. | Przewód poziomy .....   | 173 |
| 11.2.3.2. | Przewody o zmiennej konfiguracji w pionie .....                                   | 174 |
| 11.2.4.   | Rodzaje zadań obliczeniowych .....  | 179 |
| 11.3.     | Ustalony przepływ odcinkami jednostajny w pojedynczym przewodzie zamkniętym ..... | 179 |
| 11.4.     | Ustalony przepływ niejednostajny w pojedynczym przewodzie zamkniętym .....        | 180 |
| 11.4.1.   | Rodzaje zagadnień .....   | 180 |
| 11.4.2.   | Matematyczny opis przepływu .....   | 181 |
| 11.4.2.1. | Równania ruchu .....  | 181 |
| 11.4.2.2. | Wyznaczanie naprężenia stycznego .....  | 182 |
| 11.4.3.   | Konfuzory i dyfuzory .....  | 183 |
| 11.4.4.   | Przewód z wydatkiem bocznym .....   | 184 |
| 11.4.4.1. | Aspekty techniczne .....  | 184 |
| 11.4.4.2. | Obliczenia hydrauliczne .....   | 185 |
| 11.4.4.3. | Równomierność odpływu bocznego .....  | 187 |
| 11.4.5.   | Dysza de Laval'a .....  | 188 |
| 11.5.     | Przepływ nieustalony w pojedynczym przewodzie zamkniętym .....                    | 190 |
| 11.5.1.   | Przypadek cieczy o stałej gęstości .....  | 190 |
| 11.5.2.   | Przypadek cieczy o zmiennej gęstości .....  | 192 |
| 11.5.2.1. | Uderzenie hydrauliczne w przewodzie długim .....                                  | 192 |
| 11.5.2.2. | Przewód o skończonej długości .....   | 196 |
| 11.5.2.3. | Uderzenie hydrauliczne w układzie rzeczywistym .....                              | 197 |
| 11.6.     | Zasilanie przewodów zamkniętych .....   | 198 |
| 11.6.1.   | Możliwości techniczne .....   | 198 |
| 11.6.2.   | Zbiorniki zasilające .....  | 198 |
| 11.6.3.   | Pompy .....   | 201 |
| 11.6.3.1. | Uwagi wstępne .....   | 201 |
| 11.6.3.2. | Hydrauliczny opis działania pompy .....   | 202 |
| 11.6.3.3. | Zjawiska w przewodzie ssącym .....  | 203 |
| 11.6.3.4. | Charakterystyki pomp .....  | 204 |
| 11.6.3.5. | Charakterystyka przewodu .....  | 206 |
| 11.6.3.6. | Dobór pompy .....   | 206 |
| 11.7.     | Uwagi o przepływach przy obniżonym ciśnieniu .....                                | 207 |
| 12.       | Ustalony ruch cieczy w sieciach przewodów zamkniętych .....                       | 208 |
| 12.1.     | Uwagi ogólne .....  | 208 |
| 12.2.     | Elementy sieci .....  | 209 |
| 12.2.1.   | Odcinki przewodów .....   | 209 |
| 12.2.2.   | Węzły .....   | 209 |
| 12.2.3.   | Punkty skrajne .....  | 211 |
| 12.3.     | Ilościowy opis zagadnienia .....  | 212 |
| 12.3.1.   | Zestawienie niewiadomych .....  | 212 |
| 12.3.2.   | Zestawienie równań .....  | 212 |
| 12.3.3.   | Formułowanie zagadnień .....  | 212 |
| 12.3.3.1. | Zasady ogólne .....   | 212 |
| 12.3.3.2. | Sieć rozgałęziona .....   | 213 |
| 12.3.3.3. | Sieć pierścieniowa .....  | 215 |

---

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 13.       | Ruch cieczy w korytach otwartych .....           | 216 |
| 13.1.     | Uwagi wstępne .....                              | 216 |
| 13.2.     | Charakterystyka koryt otwartych .....            | 216 |
| 13.2.1.   | Aspekty techniczne .....                         | 216 |
| 13.2.2.   | Schematyzacja koryt naturalnych .....            | 220 |
| 13.2.3.   | Charakterystyka hydrauliczna .....               | 221 |
| 13.3.     | Równania ruchu dla koryt otwartych .....         | 227 |
| 13.4.     | Przepływ ustalony i jednostajny .....            | 229 |
| 13.4.1.   | Wyznaczanie naprężeń stycznych na dnie .....     | 229 |
| 13.4.2.   | Wzory obliczeniowe .....                         | 231 |
| 13.4.3.   | Krzywe prędkości i wydatku .....                 | 234 |
| 13.4.4.   | Przekroje wielodzielne .....                     | 237 |
| 13.4.5.   | Przekrój najkorzystniejszy hydraulicznie .....   | 239 |
| 13.4.6.   | Ruch krytyczny .....                             | 240 |
| 13.5.     | Przepływ ustalony i niejednostajny .....         | 240 |
| 13.5.1.   | Równanie profilu zwierciadła cieczy .....        | 240 |
| 13.5.2.   | Warunek graniczny .....                          | 242 |
| 13.5.3.   | Wyznaczanie linii zwierciadła cieczy .....       | 242 |
| 13.5.4.   | Zastosowanie równania Bernoulliego .....         | 243 |
| 13.5.5.   | Zmiana charakteru przepływu .....                | 245 |
| 13.6.     | Przepływ nieustalony i niejednostajny .....      | 245 |
| 13.6.1.   | Równania de Saint-Venanta .....                  | 245 |
| 13.6.2.   | Formułowanie zagadnień .....                     | 248 |
| 13.6.3.   | Rozwiązywanie zagadnień .....                    | 249 |
| 13.6.4.   | Uprozczone postacie równań ruchu .....           | 250 |
| 14.       | Ruch cieczy w sieciach kanałów otwartych .....   | 252 |
| 14.1.     | Ogólna charakterystyka sieci .....               | 252 |
| 14.2.     | Połączenia i punkty skrajne odcinków sieci ..... | 253 |
| 14.3.     | Ustalone przepływy w sieciach .....              | 256 |
| 14.4.     | Nieustalone przepływy w sieciach .....           | 257 |
| 15.       | Strumienie swobodne .....                        | 259 |
| 15.1.     | Charakterystyka ogólna .....                     | 259 |
| 15.2.     | Strumienie niezatopione .....                    | 260 |
| 15.3.     | Strumienie zatopione .....                       | 262 |
| 16.       | Zjawiska lokalne .....                           | 264 |
| 16.1.     | Uwagi ogólne .....                               | 264 |
| 16.2.     | Przepływ cieczy nad przelewem .....              | 264 |
| 16.2.1.   | Definicja pojęcia „przelew” .....                | 264 |
| 16.2.2.   | Obliczanie wydatku przelewu .....                | 266 |
| 16.2.2.1. | Przelewy niezatopione .....                      | 266 |
| 16.2.2.2. | Przelewy zatopione .....                         | 270 |
| 16.2.2.3. | Inne profile przelewowe .....                    | 271 |
| 16.2.2.4. | Przelewy boczne .....                            | 271 |
| 16.2.3.   | Współczynniki wydatku dla przelewów .....        | 272 |
| 16.3.     | Wypływ cieczy przez otwór .....                  | 274 |
| 16.3.1.   | Definicja pojęcia „otwór” .....                  | 274 |
| 16.3.2.   | Obliczanie wydatku otworu .....                  | 275 |
| 16.3.2.1. | Otwór niezatopiony .....                         | 275 |
| 16.3.2.2. | Otwór zatopiony .....                            | 276 |
| 16.3.2.3. | Wypływ spod zasuw .....                          | 277 |
| 16.3.3.   | Współczynniki wydatku otworów .....              | 278 |
| 16.3.4.   | Wpływ przystawek .....                           | 279 |
| 16.4.     | Odskok hydrauliczny .....                        | 280 |

|  |     |
|--|-----|
| 17. Przepływy w obiektach kubaturowych .....   | 284 |
| 17.1. Uwagi ogólne .....   | 284 |
| 17.2. Zbiorniki retencyjne .....   | 286 |
| 17.3. Reaktory przepływowe .....   | 287 |
| 17.3.1. Uwagi ogólne .....   | 287 |
| 17.3.2. Charakterystyka hydrauliczna reaktora przepływowego .....                              | 288 |
| 17.3.3. Wyznaczanie czasu zatrzymania .....  | 290 |
| 17.3.3.1. Zasady ogólne .....  | 290 |
| 17.3.3.2. Model tłokowy .....  | 291 |
| 17.3.3.3. Krzywa gęstości rozkładu czasu zatrzymania masy .....                                | 291 |
| 17.3.3.4. Szczególne przypadki gęstości rozkładu stężenia końcowego .....                      | 295 |
| 17.3.3.5. Gęstość rozkładu stężenia znacznika jako funkcjonalna charakterystyka reaktora ..... | 296 |
| 17.3.4. Reaktory recyrkulacyjne .....  | 298 |
| 18. Podstawy teorii filtracji .....  | 303 |
| 18.1. Charakterystyka przepływu filtracyjnego .....  | 303 |
| 18.1.1. Pojęcia ogólne .....   | 303 |
| 18.1.2. Porowatość ośrodka .....   | 304 |
| 18.1.3. Prędkość filtracji .....   | 305 |
| 18.1.4. Równania zachowania .....  | 308 |
| 18.1.4.1. Uwagi ogólne .....   | 308 |
| 18.1.4.2. Równanie zachowania masy .....   | 308 |
| 18.1.4.3. Prawo Darcy'ego .....  | 309 |
| 18.1.5. Przewodność hydrauliczna .....   | 311 |
| 18.2. Filtracja przestrzenna .....   | 313 |
| 18.2.1. Bilans niewiadomych i równań .....   | 313 |
| 18.2.2. Formułowanie zagadnienia .....   | 315 |
| 18.3. Filtracja podłużna .....   | 319 |
| 18.3.1. Uwagi ogólne .....   | 319 |
| 18.3.2. Podstawowe równania modelu podłużnego .....  | 320 |
| 18.3.2.1. Charakterystyka modelu .....   | 320 |
| 18.3.2.2. Równanie ciągłości .....   | 322 |
| 18.3.2.3. Uśrednione prawo Darcy'ego .....   | 322 |
| 18.3.2.4. Równanie Boussinesqa dla modelu podłużnego .....                                     | 323 |
| 18.3.3. Formułowanie zagadnienia .....   | 323 |
| 18.3.4. Zagadnienia ustalone .....   | 324 |
| 19. Podobieństwo i zasady modelowania .....  | 325 |
| 19.1. Charakterystyka zagadnienia .....  | 325 |
| 19.2. Podstawowa koncepcja opisu podobieństwa zjawisk .....                                    | 326 |
| 19.3. Sprowadzanie równań do postaci bezwymiarowej .....                                       | 327 |
| 19.3.1. Zasady ogólne .....  | 327 |
| 19.3.2. Bezwymiarowa postać równania zachowania masy .....                                     | 329 |
| 19.3.3. Bezwymiarowa postać równania zachowania pędu .....                                     | 330 |
| 19.3.4. Bezwymiarowe postacie pozostałych równań ruchu .....                                   | 331 |
| 19.4. Interpretacja liczb kryterialnych .....  | 331 |
| 19.5. Zastosowanie metody .....  | 332 |
| 20. Mierzenie wielkości fizycznych .....   | 333 |
| 20.1. Zasady ogólne .....  | 333 |
| 20.2. Cechowanie przyrządów pomiarowych .....  | 334 |
| 20.3. Pomiary hydrauliczne .....   | 336 |
| Bibliografia .....   | 339 |
| Załącznik – tabele .....   | 341 |
| Skorowidz nazwisk .....  | 346 |
| Skorowidz rzeczy .....   | 347 |

---

## Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli

### Oznaczenia

|            |  |
|------------|--|
| $a$        | – prędkość rozchodzenia się zaburzeń w ośrodku ciągłym |
| $b$        | – szerokość  |
| $B$        | – szerokość swobodnej powierzchni                      |
| $c$        | – stężenie masowe substancji rozpuszczonej             |
| $c_w$      | – ciepło właściwe                                      |
| $C$        | – współczynnik Chezy’ego                               |
| $C_Z$      | – obwód zwilżony                                       |
| $d$        | – średnica   |
| $d_c$      | – charakterystyczny wymiar liniowy                     |
| $d_e$      | – miarodajna średnica ziaren                           |
| $D$        | – średnica   |
| $[D]$      | – tensor prędkości deformacji                          |
| $D_w$      | – współczynnik wyrównywania temperatury                |
| $e$        | – energia wewnętrzna                                   |
| $E$        | – energia mechaniczna strumienia cieczy                |
| $[E]$      | – tensor jednostkowy                                   |
| $E_C$      | – moduł sprężystości cieczy                            |
| $E_S$      | – moduł sprężystości ciała stałego                     |
| $Eu$       | – liczba Eulera  |
| $f$        | – jednostkowa siła masowa                              |
| $F$        | – siła   |
| $Fr$       | – liczba Froude’a                                      |
| $g$        | – przyspieszenie ziemskie                              |
| $G$        | – siła ciężkości                                       |
| $h$        | – głębokość średnia                                    |
| $h_c$      | – głębokość krytyczna                                  |
| $h_n$      | – głębokość normalna                                   |
| $h_1, h_2$ | – głębokości sprzężone                                 |
| $H$        | – głębokość  |
| $H_C$      | – zagłębienie środka ciężkości                         |
| $H_m$      | – głębokość maksymalna                                 |
| $H_{str}$  | – wysokość straty energii mechanicznej                 |
| $i, j, k$  | – wersory kartezjańskiego układu współrzędnych         |
| $i_c$      | – spadek krytyczny                                     |
| $i_f$      | – spadek hydrauliczny                                  |
| $i_o$      | – spadek dna   |
| $j_e$      | – jednostkowy strumień energii                         |
| $I$        | – spadek swobodnej powierzchni                         |
| $I$        | – pęd  |
| $I_P$      | – strumień pędu  |
| $k$        | – stała Boltzmanna                                     |

---

|                  |  |
|------------------|--|
| $k_s$            | – chropowatość bezwzględna   |
| $k_T$            | – kinetyczna energia turbulencji   |
| $K$              | – skalarny współczynnik przewodności (filtracji) ośrodka porowatego                              |
| <b>[K]</b>       | – tensorowy współczynnik filtracji   |
| $K_L$            | – współczynnik podłużnej dyspersji substancji rozpuszczonej                                      |
| $K_p$            | – współczynnik przepuszczalności ośrodka porowatego  |
| $K_w$            | – moduł przepływu (przewodność rurociągu lub kanału)   |
| $Kn$             | – liczba Knudsen   |
| $l$              | – długość  |
| $l_m$            | – droga mieszania wg Prandtla  |
| $l_o$            | – długość odcinka początkowego   |
| $L$              | – długość  |
| $L_B$            | – długość odskoku hydraulicznego   |
| $L_o$            | – długość odcinka przejściowego  |
| $L_p$            | – długość przystawki   |
| $m$              | – strumień masy  |
| $m_a$            | – adwekcyjny strumień masy   |
| $m_k$            | – współczynnik szorstkości wg Kuttera  |
| $m_M$            | – masa molekuly  |
| $m_w$            | – miąższość warstwy wodonośnej   |
| $M$              | – masa   |
| $n$              | – współczynnik szorstkości wg Manninga (w hydraulice strumieni); porowatość (w teorii filtracji) |
| $\mathbf{n}$     | – wektor jednostkowy, prostopadły do powierzchni (normalny)                                      |
| $n_e$            | – porowatość efektywna   |
| $n_z$            | – efektywny współczynnik szorstkości   |
| $N$              | – siła naporu  |
| $Nu$             | – liczba Nusselta  |
| $p$              | – ciśnienie  |
| $p_{\text{atm}}$ | – ciśnienie atmosferyczne  |
| $p_c$            | – ciśnienie całkowite  |
| $p_{ij}$         | – współrzędne tensora naprężenia   |
| $\mathbf{p}_n$   | – naprężenie   |
| $p_o$            | – ciśnienie zewnętrzne   |
| <b>[P]</b>       | – tensor naprężenia  |
| $P_c$            | – funkcja ciśnienia  |
| $Pr$             | – liczba Prandtla  |
| $q$              | – wydatek jednostkowy  |
| $q_L$            | – dopływ boczny, odniesiony do jednostki długości strumienia                                     |
| $Q$              | – wydatek płynu (objętościowe natężenie przepływu)   |
| $r$              | – promień wodzący  |
| $r_{\text{ef}}$  | – efektywność reaktora   |
| $r_N$            | – ramię siły naporu  |
| $R$              | – promień  |
| $Re$             | – liczba Reynoldsa   |
| $R_h$            | – promień hydrauliczny   |
| $s_w$            | – depresja wody podziemnej   |
| $S$              | – pole powierzchni   |
| $Sh$             | – liczba Strouhala   |
| $S_s$            | – współczynnik pojemności sprężystej   |
| $t$              | – czas   |

---

|                 |   |
|-----------------|---|
| $t_p$           | – czas zatrzymania masy w układzie                                |
| $t_u$           | – czas uśredniania  |
| $T$             | – temperatura   |
| $\mathbf{u}$    | – wektor rzeczywistej prędkości cieczy (adwekcji)                 |
| $u_C$           | – moduł prędkości molekuly  |
| $u_f$           | – prędkość filtracji (wydatek jednostkowy, strumień Darcy'ego)    |
| $u_p$           | – prędkość porowa   |
| $u_s$           | – prędkość swobodnej powierzchni cieczy                           |
| $u_x, u_y, u_z$ | – kartezjańskie składowe wektora prędkości                        |
| $U$             | – skala prędkości   |
| $v$             | – moduł prędkości uśrednionej w przekroju poprzecznym strumienia  |
| $\mathbf{v}$    | – wektor prędkości uśrednionej w przekroju poprzecznym strumienia |
| $v_c$           | – prędkość krytyczna  |
| $v_g$           | – prędkość graniczna  |
| $v_{nr}$        | – prędkość nierozmywająca   |
| $v_{nz}$        | – prędkość niezamulająca  |
| $v_s$           | – prędkość ścianki  |
| $v^*$           | – prędkość dynamiczna (ścinająca)                                 |
| $V$             | – objętość  |
| $\mathbf{w}$    | – prędkość wiatru   |
| $w_b$           | – dopływ boczny   |
| $w_{oc}$        | – współczynnik odsączalności                                      |
| $\mathbf{W}$    | – siła wyporu (Archimedesesa)                                     |
| $x, y, z$       | – współrzędne kartezjańskie                                       |
| $y_s$           | – odległość od najbliższej ścianki                                |
| $z_c$           | – rzędna środka ciężkości   |
| $z_d$           | – rzędna dna zbiornika  |
| $z_g$           | – rzędna swobodnej powierzchni cieczy                             |
| $\alpha$        | – współczynnik de Saint-Venanta (Coriolisa)                       |
| $\alpha_p$      | – współczynnik przekroju  |
| $\beta$         | – kąt   |
| $\gamma_B$      | – współczynnik szorstkości wg Bazina                              |
| $\delta$        | – grubość hydrodynamicznej warstwy przyściennej                   |
| $\delta_L$      | – grubość podwarstwy laminarnej                                   |
| $\delta_T$      | – grubość temperaturowej warstwy przyściennej                     |
| $\Delta h$      | – strata energii mechanicznej                                     |
| $\Delta s$      | – eskok hydrauliczny  |
| $\varepsilon$   | – hropowatość względna powierzchni                                |
| $\varepsilon_T$ | – prędkość dyssypacji energii                                     |
| $\chi$          | – wykładnik izentropy   |
| $\chi_T$        | – stała von Karmana   |
| $\lambda$       | – współczynnik strat na długości wg Nikuradsego                   |
| $\lambda_m$     | – współczynnik molekularnego przewodzenia ciepła                  |
| $\lambda_s$     | – intensywność ruchu śrubowego                                    |
| $\mu$           | – dynamiczny współczynnik lepkości molekularnej                   |
| $\mu_p$         | – współczynnik wydatku przelewu                                   |
| $\mu_T$         | – dynamiczny współczynnik lepkości burzliwej (turbulentnej)       |
| $\mu_W$         | – współczynnik wydatku otwory                                     |
| $\mu_Z$         | – współczynnik wydatku zasuw                                      |

|             |   |
|-------------|---|
| $\nu$       | – kinematyczny współczynnik lepkości molekularnej               |
| $\nu_T$     | – kinematyczny współczynnik lepkości burzliwej (turbulentnej)   |
| $\xi$       | – współczynnik straty lokalnej (miejscowej)                     |
| $[\Pi]$     | – tensor naprężeń burzliwych (Reynoldsa)                        |
| $\Pi_{ij}$  | – współrzędne tensora Reynoldsa                                 |
| $\rho$      | – gęstość (c – cieczy, w – wody, p – powietrza, s – substancji) |
| $\tau_b$    | – współczynnik korekcyjny dla przelewu bocznego                 |
| $\tau_z$    | – współczynnik zatopienia (przelewu lub otworu)                 |
| $\tau_d$    | – naprężenie denne  |
| $\tau_o$    | – czas życia osiadłego molekuly                                 |
| $\tau_p$    | – naprężenie powierzchniowe                                     |
| $\tau_s$    | – naprężenie styczne  |
| $\tau_w$    | – naprężenie wywołane wiatrem                                   |
| $\varphi$   | – potencjał   |
| $\varphi_p$ | – współczynnik prędkości  |
| $\psi$      | – funkcja prądu   |
| $\omega$    | – prędkość kątowa   |
| $\Omega$    | – wektor rotacji prędkości                                      |

### *Symbole*

|   |   |
|---|---|
| — | – wartość zmiennej, uśredniona w czasie   |
| ~ | – wartość zmiennej, uśredniona względem współrzędnych przestrzennych  |
| ' | – turbulentna fluktuacja prędkości  |
| ° | – różnica między rzeczywistą wartością zmiennej, a jej wartością uśrednioną w obszarze wypełnionym materiałem porowatym |
| × | – jak wyżej, gdy uśrednianie odbywa się w przestrzeni porowej   |
| ⊗ | – znak iloczynu diadycznego   |

---

## Słowo wstępne

Jeszcze kilkadziesiąt lat temu mianem hydrauliki określano półempiryczną naukę, badającą prawa opisujące ruch cieczy, głównie metodami doświadczalnymi, wyraźnie różnicując ją względem mechaniki płynów, którą – przy tym samym przedmiocie badań – zaliczano do nauk teoretycznych. Główną tego przyczyną były ograniczone możliwości rozwiązywania ogólnych równań ruchu cieczy i gazów, cechujących się bardzo wysokim stopniem formalnej złożoności. Warto wszakże zauważyć, że nawet w owych latach zróżnicowanie to nie było ściśle zdefiniowane i miało charakter raczej werbalny. Dobrze ilustruje to zapis w Encyklopedii Powszechnej PWN z roku 1974, zgodnie z którym „...hydraulika bada prawa ruchu cieczy, w odróżnieniu od hydromechaniki, z którą jest ściśle związana”.

Jednakże z czasem owo metodyczne zróżnicowanie straciło na znaczeniu – w ramach mechaniki płynów wyprowadzano równania szczegółowe, które coraz lepiej opisywały problemy praktyczne, zaś specjaliści z zakresu hydrauliki, wyczerpawszy ograniczoną liczbę prostych przypadków, dla których można było uzyskać pożyteczne zależności empiryczne, zaczęli podejmować bardziej złożone tematy.

Przełom nastąpił z upowszechnieniem maszyn liczących i jednoczesnym rozwojem metod numerycznych. Dla skomplikowanych równań fizyki matematycznej, poprzednio niedostępnych inżynierom, można było wreszcie uzyskiwać rozwiązania – przybliżone, lecz wystarczająco dokładne do celów nie tylko praktycznych, ale i badawczych.

Od tej pory hydraulikę można traktować jako dział mechaniki płynów, zajmujący się praktycznym zastosowaniem ogólnych praw ruchu (a w szczególnym przypadku – bezruchu) cieczy i gazów. Naturalną tego konsekwencją stało się wewnętrzne zróżnicowanie hydrauliki, odzwierciedlające techniczne aspekty różnych grup zagadnień praktycznych. Inną specyfikę mają bowiem maszyny przepływowe (pompy, turbiny, wentylatory, dmuchawy, sprężarki...), inną – aparaty i obiekty pływające i latające (statki i okręty, samoloty, balony, rakiety, pociski...), a jeszcze inną – budowle hydrotechniczne (konstrukcje piętrzące, elektrownie wodne, porty morskie i rzeczne, obiekty służące regulacji rzek czy ochronie brzegów morskich, systemy melioracyjne ...).

Za najmłodszą ze specjalistycznych gałęzi hydrauliki należy uznać tę, w ramach której podejmowane są problemy przepływowe, występujące w środowisku człowieka – zarówno naturalnym, jak i antropogenicznym. Ich wyodrębnienie jest uzasadnione tym, że podejmowane przez tę gałąź problemy są jednocześnie i bezpośrednio związane z potrzebami ludzi oraz uwarunkowaniami przyrody, co jest szczególnie ważne w inżynierii środowiska, inżynierii sanitarnej, hydrologii, meteorologii, hydrogeologii i innych gałęziach nauk o Ziemi.

Książka, którą Czytelnik bierze do ręki, jest podręcznikiem akademickim, zawierającym pełny wykład zagadnień związanych z ruchem płynu, zorientowanym na potrzeby tych wydziałów wyższych uczelni technicznych, które oferują nauczanie w zakresie Inżynierii Środowiska oraz kierunków pokrewnych. Jej tytuł, wzorem Ludwiga Prandtla [37], ma na

celu raczej podkreślanie wspomnianych już podobieństw między mechaniką płynów i hydrauliką, niż akcentowanie czynników, różnicujących te gałęzie nauki.

Przedstawione uwarunkowania znajdują swe odbicie w układzie i w treści książki. Jej pierwsza część zawiera wiadomości podstawowe. Szczególny nacisk położono na związek omawianej tematyki z fizyką i mechaniką ogólną. W części drugiej, poświęconej hydraulicznym modelom procesów przepływowych, zwrócono uwagę na sposoby stawiania zagadnień, zarówno od strony obliczeniowej (pod kątem praktycznego stosowania metod numerycznych), jak też dyskutując ich aspekty techniczne, ważne w inżynierii środowiska. Treść tego podręcznika obejmuje program studiów trzystopniowych. Materiału dla dwóch pierwszych stopni (inżynierskiego i magisterskiego) nie wyodrębniono, gdyż jego dobór jest kwestią indywidualnych decyzji programowych, natomiast materiał odpowiadający trzeciemu stopniowi (studia doktoranckie) został wyróżniony drobniejszą czcionką.